

EFEITO DA TEXTURIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE DE METAL DURO POR LASER DE FEMTOSSEGUNDOS NAS CARACTERÍSTICAS DO CAVACO DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO

Fabiano Gonçalves Coelho Junior, fabiano_junior18@hotmail.com¹

Elton Mesquita de Almeida, eltin17@hotmail.com.br¹

Marcelo Bertolete Carneiro, bertolete@sc.usp.br^{2,3}

Ricardo Elgul Samad, resamad@ipen.br³

Nilson Dias Vieira Júnior, nilsondv@ipen.br³

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br³

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br^{1,3}

¹Universidade Federal do Espírito Santo – Centro Tecnológico – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Tecnologia Mecânica, Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910, Vitória/ES

²Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Engenharia de Produção – Av. Trabalhador São Carlense, 400, 13566-590, São Carlos/SP

³Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Centro de Lasers e Aplicações, Av. Lineu Prestes, 2242, 05508-000, São Paulo/SP

Resumo: A texturização da superfície de saída (A_f) de ferramentas de corte por lasers de pulsos ultracurtos pode ser uma técnica promissora na redução do atrito na área de contato cavaco-ferramenta, devido a mudanças no sistema tribológico pela modificação da topografia da superfície. Dessa forma o objetivo do trabalho foi investigar o efeito da texturização por laser de femtossegundos (10^{-15} s) sobre a superfície de saída de insertos de metal duro através da avaliação das características do cavaco. Para isso, foram coletados cavacos de aço inoxidável austenítico formados durante ensaios de vida de ferramentas de metal duro sem textura (referência) e com textura. Os cavacos foram caracterizados quanto ao tipo e forma; a espessura da zona de fluxo foi avaliada a partir de micrografias das seções longitudinais das amostras dos cavacos; e por fim foi estimado o grau de recalque. Os resultados mostraram que a texturização de A_f , por laser de pulsos ultracurtos com duração próxima de 30 femtossegundos, promoveu a alteração da forma dos cavacos de longos para curtos ao longo da vida da ferramenta, indicou uma tendência média de redução da espessura da zona de fluxo e apresentou um decaimento do grau de recalque.

Palavras-chave: texturização, laser de femtossegundos, morfologia do cavaco, zona de fluxo, grau de recalque.

1. INTRODUÇÃO

A superfície de saída (A_f) da ferramenta de corte é sujeitada à elevadas tensões de compressão e deformações cisalhantes durante a usinagem. Estas condições favorecem ligações metálicas na interface cavaco-ferramenta, que influenciam as forças de corte, temperatura e mecanismos de desgaste, afetando a vida da ferramenta e consequentemente seu desempenho (Trent; Wright, 2000; Ferraresi, 2011 e Machado et al., 2011).

Estudos tem mostrado que a texturização de ferramentas de corte por lasers de pulsos ultracurtos é promissora por promover uma modificação da topografia através de uma ablação controlada e sem efeitos térmicos (Liang et al., 2003 e Samad et al., 2012), permitindo a redução do atrito durante a usinagem devido a mudanças no sistema tribológico (Kawasegi et al., 2009; Da Silva et al., 2013; Sugihara; Enomoto, 2013 e Esteves et al., 2015). O estudo da interface cavaco-ferramenta é um campo pouco explorado devido à dificuldade de acesso experimental, mas que é de fundamental interesse para se compreender os efeitos tribológicos que dificultam o processo de usinagem.

Nesse contexto é importante definir a zona de fluxo do cavaco como sendo uma região caracterizada por uma intensa deformação cisalhante, formada numa região bem próxima, mas não necessariamente, na interface cavaco-ferramenta, devido a um gradiente de velocidade (Machado et al., 2011). Assim, pode-se identificar a zona de fluxo, como sendo uma região onde não é mais possível se distinguir as fases ou microconstituintes do material em razão da intensa deformação ali desenvolvida.

Nesta região, o calor gerado exerce um papel muito importante, não só ditando o mecanismo e as condições de deformação na zona de aderência, mas também influenciando diretamente o desgaste da ferramenta (Trent; Wright, 2000 e Machado et al., 2011).

O grau de recalque (Rc), por sua vez, é um parâmetro que dá uma boa indicação da quantidade de deformação sofrida pelo material durante a formação do cavaco (Trent; Wright, 2000). Rc é diretamente influenciado pelas condições da interface cavaco-ferramenta, a qual é responsável pela resistência ao movimento do cavaco e quantidade de energia consumida durante o processo de usinagem (Machado et al., 2011).

Assim, a modificação da superfície através da texturização pode contribuir para a redução do atrito gerando uma perturbação na zona de cisalhamento secundária, alterando a espessura da zona de fluxo e consequentemente as características do cavaco.

Baseado no exposto, o presente trabalho tem por objetivo investigar o efeito da texturização por laser de femtossegundos (10^{-15} s) sobre a superfície de saída (A_γ) de insertos de metal duro, através da investigação das características do cavaco relacionadas às alterações da morfologia (tipo e forma), espessura da zona de fluxo e grau de recalque de cavacos gerados durante ensaios de vida em aço inoxidável austenítico.

2. METODOLOGIA

A investigação das características do cavaco foi realizada concomitantemente com os testes de vida da ferramenta, conduzidos através de ensaios de torneamento semi-ortogonal a seco em torno CNC Romi Centur 35D, o qual possui rotação máxima de 3000 rpm e 15 cv de potência. O material de trabalho consistiu de uma barra com 500 mm de comprimento e 70 mm de diâmetro de aço inoxidável austenítico, designação Villares Metals V304UF, com composição química básica descrita na Tab. (1). Para tanto, foram utilizados insertos comerciais de metal duro, classe H13A da Sandvik, sem revestimento, com geometria triangular TPUN 160304, os quais foram montados em um porta-ferramenta CTGPR 2525 M16, conferindo uma geometria de corte com ângulo de inclinação (λ_s) de 0° , ângulo de saída positivo (γ_0) de 6° e ângulo de posição (χ_r) de 91° . As condições de corte foram mantidas constantes em: v_c (velocidade de corte)=100 m/min; f (avanço)=0,2 mm/volta; a_p (profundidade de corte)=2,0 mm e L_f (percurso de avanço)=10 mm.

Tabela 1. Composição química básica do aço inoxidável austenítico V304UF (% massa) (Barbosa, 2014).

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	Fe	Outros
0,08	1,85	0,43	17,1	9,82	0,06	0,03	0,59	69,3	0,74

Foram avaliados o comportamento de duas ferramentas, uma de referência (sem textura) e outra, cuja superfície de saída (A_γ) foi texturizada em um sistema de laser de pulsos ultracurtos de Ti-Safira, modelo Femtopower Compact Pro HR/HP da Femtolasers, utilizando energia de 12 μ J, largura temporal de 30 fs, comprimento de onda centrado em 775 nm, taxa de repetição controlada de 4 kHz, distância focal de 38 mm e velocidade de varredura do feixe de 6 mm/min. O padrão da microtextura produzida sobre A_γ consistiu de canais dispostos paralelamente à aresta principal de corte (S), em forma de “V”, com profundidade e largura médias de 30 e 33 μ m, respectivamente; e distância entre os canais (passo) de 60 μ m. A textura cobriu uma área de 2,5 mm² a partir de 300 μ m de S, como mostrado na Fig. (1).

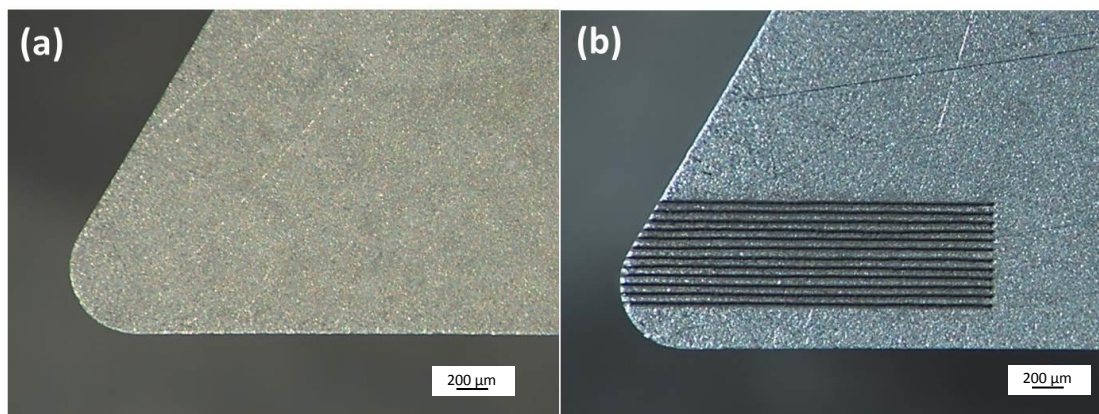


Figura 1. MO das superfícies de saída (A_γ) dos insertos de metal duro avaliados. (a) ferramenta de referência e (b) ferramenta texturizada por laser de femtossegundos.

Durante a realização dos testes de vida foram coletadas amostras dos cavacos de aço inoxidável austenítico produzidos. Os cavacos foram, inicialmente, caracterizados visualmente e posteriormente por microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), quanto ao tipo e à forma, segundo padrões de classificação definidos na norma ISO 3685 (1993).

Para a análise da zona de fluxo, amostras foram embutidas de forma a deixar a seção longitudinal do cavaco exposta. Estas foram preparadas metalograficamente e submetidas a ataque eletrolítico em solução de ácido oxálico a 10%, para revelação da microestrutura e identificação da região da zona de fluxo, a qual foi registrada em microscópio óptico.

Foram registradas imagens em diferentes regiões da mesma amostra a fim de obter várias medidas da zona de fluxo com o auxílio do programa de análise de imagens *Image J*. Devido a dificuldade de se distinguir o final da zona de fluxo foi utilizado como referência as linhas de deformação horizontais, como exemplificadas na Fig. (2).

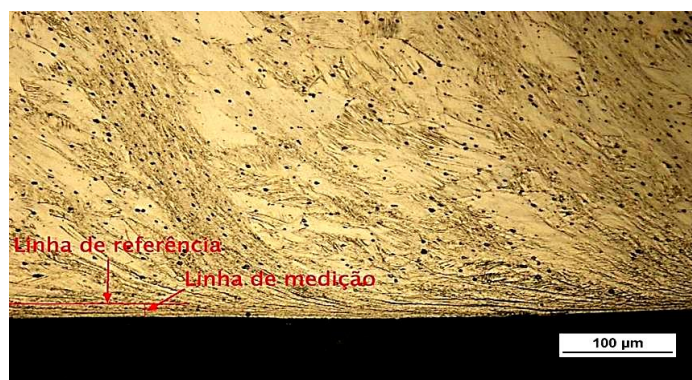


Figura 2. Exemplificação do posicionamento da linha de referência para medição da espessura da zona de fluxo.

Segundo Ferraresi (2011) e Machado et al. (2011), o grau de recalque (R_c) pode ser estimado experimentalmente através da relação entre a espessura do cavaco (h') e a espessura de corte (h), conforme a Eq. (1).

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (1)$$

Onde h , para o torneamento é obtido através da Eq. (2)

$$h = f \times \sin(\chi_r) \quad (2)$$

A espessura do cavaco foi medida com o auxílio de um micrômetro externo digital com ponta esférica da Digimess com faixa de medição de 0 a 25 mm e resolução de 0,001 mm, em dez posições aleatórias ao longo do comprimento das amostras coletadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao acompanhar os ensaios de vida para as ferramentas avaliadas, observou-se que o inserto de referência atingiu fim de vida após usar um tempo de corte (t_c) de 1,54 min ($L_f=140$ mm), o que correspondeu a 14 testes com t_c de 0,11 min ($L_f=10$ mm) cada. A ferramenta texturizada conseguiu usar o aço inoxidável austenítico até 3,30 min ($L_f=300$ mm), quando foi decretado seu fim de vida. Dessa forma, foram escolhidos para o estudo das características do cavaco, bem como para a análise da espessura da zona de fluxo e grau de recalque, os cavacos de V304UF, produzidos com os dois insertos, coletados nos testes 1, 7 e 14, que correspondiam aos tempos de corte de 0,11 min, 0,77 min e 1,54 min. Estas amostras, em termos comparativos, representam o início, meio e fim do ensaio para a ferramenta com a menor vida (referência).

A Figura (3) apresenta um quadro com imagens das amostras dos cavacos provenientes dos testes com o inserto de referência (sem textura). A primeira coluna (Fig. (3a)) se refere à MO da superfície de saída da ferramenta após cada tempo de corte avaliado; a segunda coluna (Fig. (3b)) mostra as amostras coletadas de cavacos soltos, seguida das micrografias da seção longitudinal (Fig. (3c)). A última coluna do quadro (Fig. (3d)) apresenta imagens em MEV da superfície livre do cavaco.

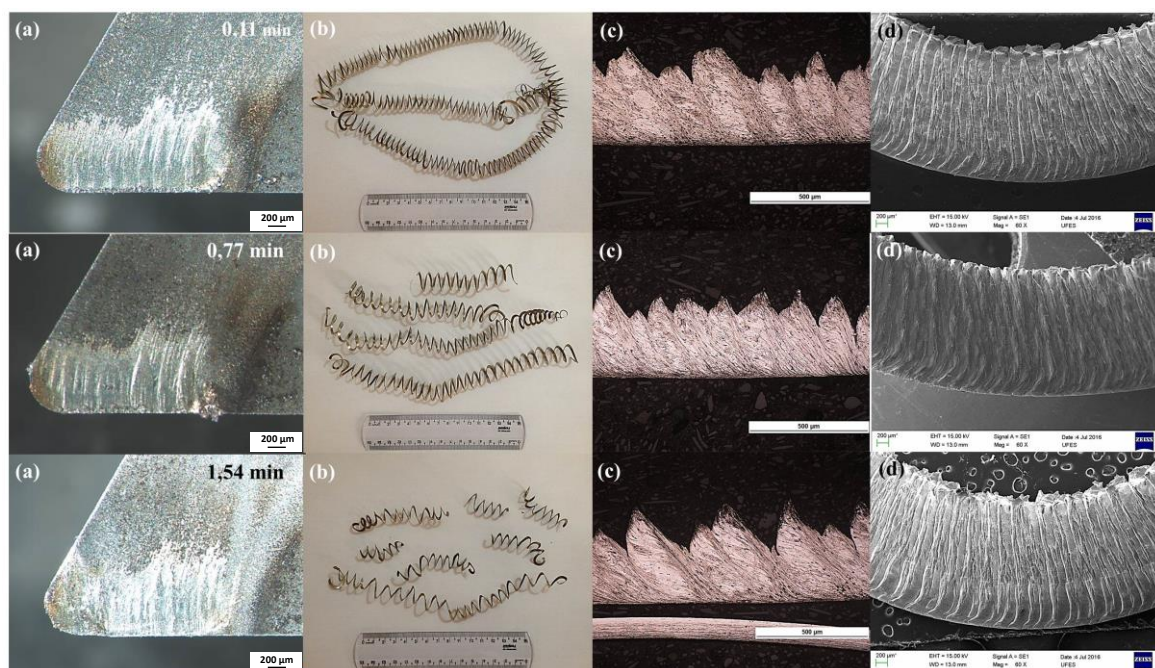


Figura 3. Caracterização dos cavacos de aço inoxidável austenítico produzidos durante o torneamento com a ferramenta de referência. (a) Superfície de saída (Ay) após t_c de 0,11 min; 0,77 min e 1,54 min; (b) cavacos soltos; (c) MO da seção longitudinal dos cavacos; e (d) MEV da superfície livre dos cavacos.

Os cavacos de V304UF formados, utilizando o inserto de referência, foram classificados como sendo do tipo segmentado e quanto à forma em helicoidal do tipo arruela, segundo os padrões da norma ISO 3685 (1993). Estes resultados mostraram concordância com os resultados de Barbosa (2014), que mostrou a morfologia segmentada dos cavacos como uma característica típica da usinagem de aços inoxidáveis. Ainda, pode ser observado na Fig. (3b) que, ao longo da vida da ferramenta, houve uma modificação no comprimento dos cavacos passando de longos para curtos.

A Figura (4) apresenta outro quadro com imagens dos cavacos de aço inoxidável austenítico relativos aos ensaios com a ferramenta texturizada.

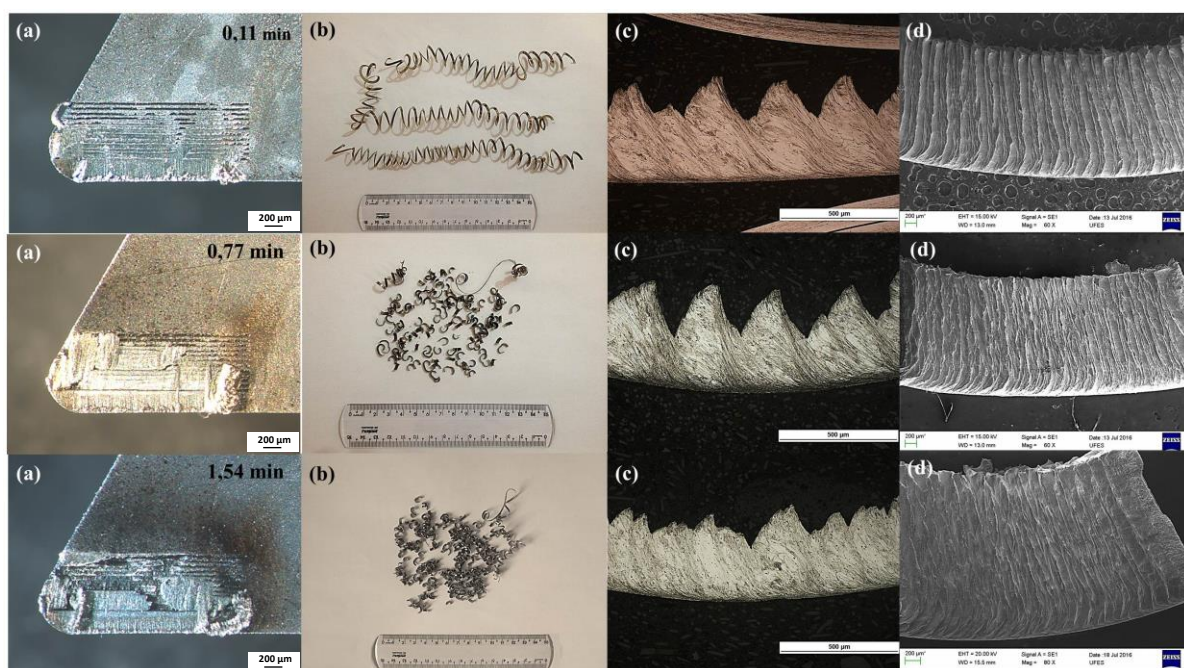


Figura 4. Caracterização dos cavacos de aço inoxidável austenítico produzidos durante o torneamento com a ferramenta texturizada. (a) Superfície de saída (Ay) após t_c de 0,11 min; 0,77 min e 1,54 min; (b) cavacos soltos; (c) MO da seção longitudinal; e (d) MEV da superfície livre do cavaco.

Ao se analisar as imagens da 3ª e 4ª colunas da Fig. (4), também foram verificadas a morfologia segmentada característica dos cavacos de aços inoxidáveis. Segundo a norma ISO 3685 (1993), os cavacos coletados após um tempo de corte de 11 min, com a ferramenta texturizada (primeira linha, Fig. (4b)), foram classificados quanto à forma em helicoidal do tipo arruela, na qual se verificou serem mais curtos do que os formados com a ferramenta de referência (Fig. (3b)). As amostras coletadas após os ensaios 7 (0,77 min) e 14 (1,54 min) mostraram alteração na forma, passando de helicoidal tipo arruela para predominantemente arco conectado (segunda linha, Fig. (4b)) e arco solto (terceira linha, Fig. (4b)), respectivamente. Esta alteração pode ser devido ao desenvolvimento do desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta texturizada, causada pela fratura das texturas no decorrer da vida deste inserto, modificando assim a geometria de corte e possivelmente o ângulo de saída efetivo (Kim et al., 2009 e Ståhl, 2012).

Devido aos resultados apresentados na Fig. (4), foi considerada uma avaliação adicional para investigar o efeito da textura, antes da fratura, na alteração da forma do cavaco. Para tanto, foram considerados os comprimentos das amostras de cavacos mais longas, as quais foram medidas com uma fita métrica, referentes aos testes de 1 ($t_c=0,11$ min) a 7 ($t_c=0,77$ min). Nesse intervalo as texturas sobre A_1 da ferramenta texturizada ainda estavam presentes e não havia evidência de fratura das mesmas. A Figura (5) apresenta um gráfico do comportamento do comprimento do cavaco em função do tempo de corte para os inserts de referência e texturizado.

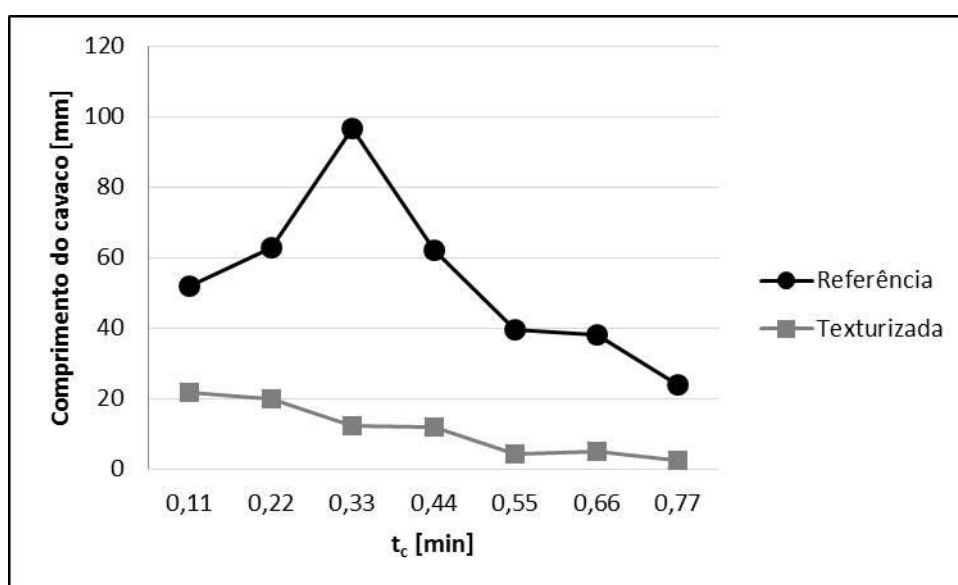


Figura 5. Comportamento do comprimento do cavaco em função da vida da ferramenta representada pelo tempo de corte (t_c).

Pode-se observar que os cavacos dos ensaios com a ferramenta texturizada apresentaram comprimentos menores em relação àqueles formados durante a usinagem com o inserto de referência. Segundo Diniz et al. (2000) e Machado et al. (2011), a forma dos cavacos longos são os que causam maiores problemas relativos a segurança e produtividade, portanto, a textura influenciou positivamente no controle do comprimento do cavaco, produzindo cavacos mais curtos ao longo da sua vida.

A Figura (6) mostra a padronização utilizada para as várias medições da espessura da zona de fluxo nas amostras de cavaco avaliadas, executadas no *software Image J*.

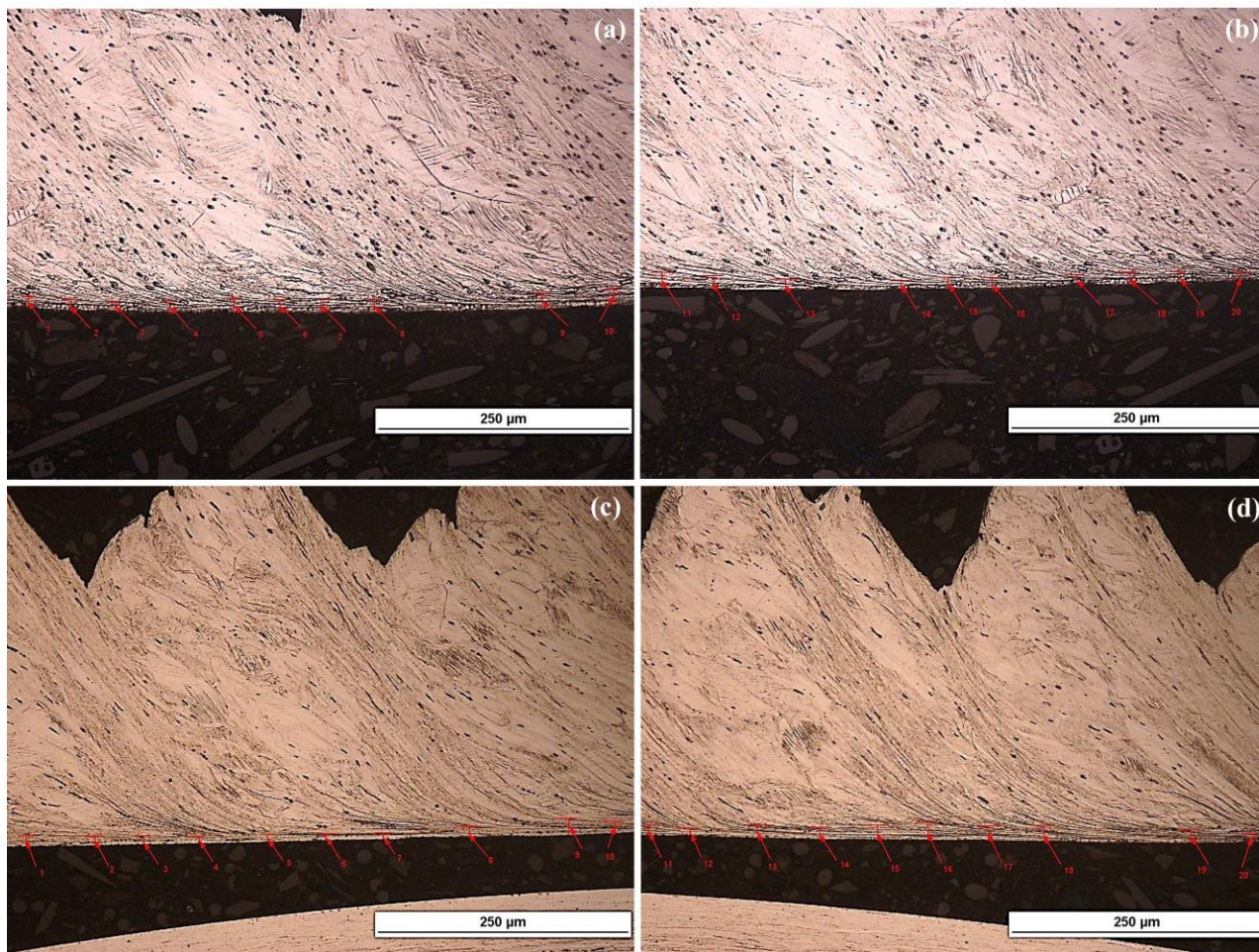


Figura 6. Posição das medições da espessura da zona de fluxo das amostras de cavaco do V304UF produzidos: (a) e (b) com a ferramenta de referência (sem textura); (c) e (d) com a ferramenta texturizada.

A Figura (7) apresenta um gráfico dos valores médios e desvios padrão da espessura da zona de fluxo dos cavacos formados durante a usinagem, utilizando as ferramentas de referência e texturizada, respectivamente; para o início, meio e fim do teste de vida, considerando o intervalo de tempo de corte.

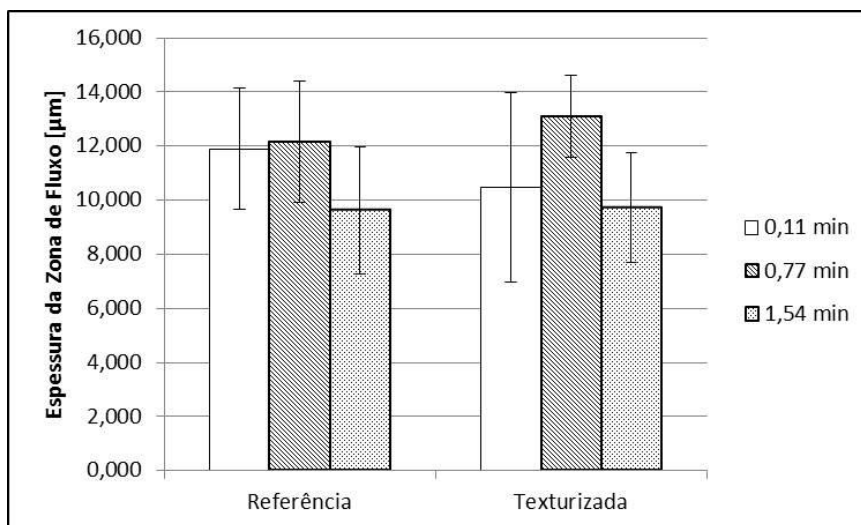


Figura 7. Espessura média da zona de fluxo dos cavacos de aço inoxidável austenítico V304UF produzidos com ferramentas de corte de referência (sem textura) e texturizada por laser de femtossegundos.

Pode ser observado no gráfico da Fig. (7) uma tendência de redução da espessura da zona de fluxo a partir de um tempo de corte de 0,77 min (teste 7) tanto para a ferramenta texturizada quanto para a de referência. Porém, estatisticamente, existe um grande espalhamento dos resultados evidenciado pelas barras de desvio padrão de forma que os valores muito próximos se confundem, não sendo possível afirmar com confiabilidade estatística a existência de diferença entre os tratamentos e durante a vida, mesmo com uma amostra de vinte medidas. Esta dispersão pode ser devido à subjetividade em se definir o limite dessa região, possivelmente pela limitação de ampliação do microscópio óptico. Esperava-se uma alteração na espessura da zona de fluxo com a aplicação da textura sobre A_γ . Uma análise mais minuciosa dessa região é requerida para que se consiga uma maior confiabilidade nos resultados e uma melhor visualização do que acontece na zona de fluxo.

A Figura (8) apresenta os resultados do grau de recalque em função do tempo de corte para amostras de cavaco em investigação.

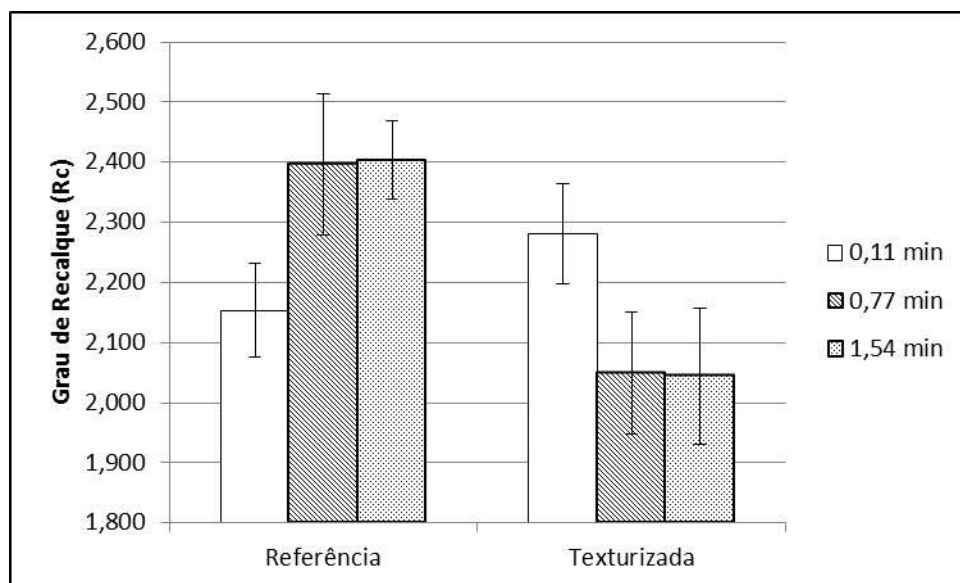


Figura 8. Comportamento do grau de recalque (Rc) em função do tempo de corte para as ferramentas de referência (sem textura) e texturizada por laser de femtossegundos.

Ao se analisar o gráfico da Fig. (8) pode-se observar comportamentos distintos do grau de recalque ao longo da vida para as duas condições de ferramentas avaliadas. Rc apresentou um aumento com o tempo quando se usinou o V304UF com o inserto de referência. A ferramenta texturizada apresentou comportamento contrário ao do inserto de referência, reduzindo com o tempo de corte. Rc apresentou um valor elevado no início do teste de vida, mas a partir da metade do tempo de vida (0,77 min) houve um decréscimo médio de 10,35%.

É sabido que o grau de recalque dá uma boa indicação da quantidade de deformação sofrida pelo cavaco, e que, as condições da interface cavaco-ferramenta, a qual oferece resistência à movimentação do cavaco sobre a superfície de saída, influenciam diretamente esta quantidade de deformação, e que este índice é função do material da peça de trabalho, material da ferramenta, condições de corte, geometria de corte, entre outros fatores (Trent; Wright, 2000; Ferraresi, 2011 e Machado et al., 2011). Assim, como exposto anteriormente, durante a análise dos resultados da zona de fluxo, foi observado que a partir do ensaio 7, que correspondia à 0,77 min de tempo de corte, as texturas começaram a se fraturar e isto promoveu, possivelmente uma mudança na geometria de corte e no sistema tribológico, fazendo com que a resistência à movimentação do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta diminuísse, e consequentemente a deformação do cavaco, como indicado pela redução dos valores de Rc.

Ao se relacionar os gráficos das Figs. (7) e (8), pode-se associar a redução do grau de recalque a partir do teste 7 à tendência da redução da espessura da zona de fluxo do cavaco com a utilização da ferramenta texturizada, visto que a possível redução da zona de fluxo indicaria também um menor atrito e, consequentemente menor restrição ao movimento do cavaco na zona de cisalhamento secundária, logo um decaimento da quantidade de deformação. A mudança na forma do cavaco com o inserto texturizado pode ter sido influenciado pelo aumento da curvatura do cavaco, uma vez que ficou evidenciado menores valores de h' . Dessa forma, o desenvolvimento da cratera pela fratura das texturas ao longo da vida, fez com que o raio de curvatura do cavaco (rc) diminuísse fazendo com que o cavaco conseguisse alcançar a deformação crítica necessária para sua quebra. Em contrapartida, nos resultados com a ferramenta de referência, não houve desenvolvimento de desgaste de cratera, além disso, o cavaco estava mais deformado e encruado e, neste caso, possivelmente, a deformação crítica para a quebra do cavaco não foi alcançada, fazendo com que os cavacos permanecessem longos (Machado et al., 2011; Ferraresi, 2010; Diniz et al., 2000).

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que a texturização por laser de femtossegundos sobre a superfície de saída de ferramentas de corte de metal duro pode ser promissora como forma de controle do cavaco, uma vez que houve alteração da forma helicoidal tipo arruela longo para cavacos para helicoidal tipo arruela curto, arco conectado e arco solto.

Não foi possível afirmar com confiabilidade estatística alteração da espessura da zona de fluxo devido à utilização de ferramenta texturizada, apenas pôde-se observar uma tendência média amparada pela redução do grau de recalque.

5. AGRADECIMENTOS

Ao fomento à pesquisa através dos processos CNPQ (405707/2013-4, 150490/2014-3 e 150188/2015-3); FAPESP (2013/26113-6) e PIIC/PIBIB/UFES 2015-2016.

6. REFERÊNCIAS

- Barbosa, P.A., 2014, “Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 234p.
- Da Silva, W.M., Suarez, M.P., Machado, A.R. and Costa, H.L., 2013, “Effect of laser surface modification on the microabrasive wear resistance of coated cemented carbide tools”, *Wear*, Vol. 302, pp. 1230-1240.
- Esteves, P.J., Bozzi, A.C., Scandian, C., Samad, R.E., Vieira Júnior, N.D., de Rossi, W., Vilar, R., Carneiro, M.B. and Barbosa, P.A., 2015, “Femtosecond laser texturing effect on abrasive wear of cemented carbide tools”, In: 23rd International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro.
- Ferraresi, D., 2011, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo. 14^a reimpressão, 751p.
- ISO 3685, 1993, “Tool-life testing with single-point turning tools”, 48p.
- Kawasegi, N., Sugimori, H., Morimoto, H., Morita, N. and Hori, I., 2009, “Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior”, *Precision Engineering*, Vol. 33, pp. 248-254.
- Kim, H-G., Sim, J-H. and Kweon, H-J., 2009, “Performance evaluation of chip breaker utilizing neural network”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 647-656.
- Liang, W.L., Ngoi, B.K.A., Lim, L.E.N., Venkatakrishnan, K. and Hee, C.W., 2003, “Micromachining of circular ring microstructure by femtosecond laser pulses”, *Optics & Laser Technology*, Vol. 35, pp. 285-290.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. e da Silva, M.B., 2011, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2 ed., 397 p.
- Samad, R.E., Machado, L.M., Junior, N.D.V. and de Rossi, W., 2012, “Ultrashort laser pulses machining”. In: *Laser Pulses – Theory, technology and applications*, InTech, pp.143-174.
- Ståhl, J-E., 2012, “Metal Cutting – Theories and Models”, Ed. Seco Tools, Lund, Sweden, 400p.
- Sugihara, T. and Enomoto, T., 2013, “Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces”, *Precision Engineering*, Vol. 37, pp. 888-896.
- Trent, E.M. and Wright, P.K., 2000, “Metal Cutting”, Ed. Butterworth-Heinemann, London, 446p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

TEXTURING EFFECT OF CEMENTED CARBIDE TOOLS BY FEMTOSECOND LASER PULSES ON THE AUSTENITIC STAINLESS STEEL CHIP CHARACTERISTICS

Fabiano Gonçalves Coelho Junior, fabiano_junior18@hotmail.com¹

Elton Mesquita de Almeida, eltin17@hotmail.com.br¹

Marcelo Bertolete Carneiro, bertolete@sc.usp.br^{2,3}

Ricardo Elgul Samad, resamad@ipen.br³

Nilson Dias Vieira Júnior, nilsondv@ipen.br³

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br³

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.alves@ufes.br^{1,3}

¹ Federal University of Espírito Santo, Department of Mechanical Engineering, CT III, Vitória/ES, 29075-910, Brazil

² School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, 13566-590, São Carlos/SP, Brazil

³ Nuclear and Energy Research Institute, Center for Lasers and Applications, São Paulo, 05508-000, Brazil

Abstract: The texturing of rake face (A_r) of cutting tools by ultrashort laser pulses can be a promising technique to reduce the friction of chip-tool interface, owing to changing tribological system by the surface topography modification. The aim of this work was to investigate the effect of femtosecond laser texturing on rake face of cemented carbide tools. The chip features (type and form), flow zone thickness, and chip thickness ratio were evaluated. Therefore, austenitic stainless steel chip samples were collected from tool-life testing performed on non-textured (reference) and textured tools. The results showed that the texturing on A_r by ultrashort laser pulses, with duration close to 30 femtoseconds, promoted the chip form changing from long to short form along the tool life. The results also showed decrease average tendency in the chip thickness, and presented decay of chip thickness ratio.

Keywords: texturing, femtosecond laser, chip features, chip thickness, chip thickness ratio

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.